

Estudio de factibilidad técnica y económica para la generación eólica y  
solar fotovoltaica en la zona de Hobo-Huila

Una Tesis Presentada Para Obtener El Título De  
Ingeniero Electricista  
Universidad tecnología de Pereira

Victor Andres Perdomo Rivas

Profesor guía;  
Alejandro Garcés

Pereira- Risaralda  
Noviembre 2015.

## **Agradecimientos**

Agradecer primero a Dios que me dio la fortaleza día a día para sacar mis proyectos a delante, a mis padres, por todo su esfuerzo y apoyo incondicional, sin los cuales esto jamás hubiese sido posible. Todo lo que he logrado se los debo a ellos, a su sacrificio y amor y por ende estaré eternamente agradecido de ser su hijo.

A la universidad y a sus profesores en especial a el ingeniero Alejandro Garcés el cual es un gran ejemplo que seguir por sus logros y su forma de ser. Agradecerle por su dedicación y tiempo para permitirme llevar adelante un proyecto a futuro.

Finalmente agradecer a mis compañeros de estudio, los cuales ha sido un apoyo incondicional en mi etapa de universitario, el trabajo en equipo y sus enseñanzas fueron lo que más agradezco de ellos. Simplemente muchas gracias por su amistad y confianza.

### **Resumen**

En el presente proyecto se realizó un estudio de factibilidad técnica y económica para la implementación de energía solar y energía eólica en una piscicultura situada en el municipio de Hobo-Huila, donde primero se hizo una revisión de la documentación básica necesaria del funcionamiento de estas dos tecnologías, esta revisión se realizó con un enfoque matemático para poder determinar la energía que puede producir una turbina eólica y un grupo de paneles solares en la zona.

Para la investigación, primero se recolectaron los datos de viento y de irradiación solar por medio de equipos de medida y páginas web, luego se procesaron los datos por medio de herramientas matemáticas como Matlab, para así determinar el potencial energético de la zona. Posteriormente se realizó una evaluación económica del sistema para determinar la factibilidad económica del proyecto.

## Contenido

Capítulo 1 Introducción .....	8
1.1 Definición del problema .....	8
1.2 Justificación .....	9
1.3 Objetivos .....	10
1.3.1 Objetivo general .....	10
1.3.2 Objetivos específicos .....	10
1.4 Metodología .....	10
1.5 Estructura del trabajo .....	11
Capítulo 2 Generación Eólica .....	12
2.1 Tipos de turbina.....	12
2.2 Turbinas eólicas grandes .....	13
2.3 Turbinas eólicas micro.....	15
2.4 Clasificación de los generadores eléctricos en aerogeneradores. ....	15
2.5 Medición y tratamiento de los datos de la velocidad del viento .....	18
2.6 Potencial Eólico .....	19
2.7 Cálculo de la energía producida por un aerogenerador .....	21
Capítulo 3 Generación Solar .....	23
3.1 Sistema fotovoltaico .....	23
3.2 Componentes de un sistema fotovoltaico .....	23
3.2 Tipos de instalación de un sistema fotovoltaico .....	26
Capítulo 4 Resultados.....	27
4.1 Potencial energético eólico en Hobo-Huila. ....	27
4.1.2 Medición de velocidad.....	28
4.1.3 Recolección de datos y tratamiento estadístico .....	28
4.1.4 Cálculo de energía Eléctrica mensual y anual. ....	29
4.2 Potencial Solar en Hobo-Huila. ....	31

4.2.1 Caracterización de la demanda de potencia y energía de la piscifactoría. ....	31
4.2.2 Determinación de la radiación Solar en la Zona. ....	32
4.2.3 Calculo de paneles solar a implementar en la psi factoría situada en Hobo-Huila .....	33
4.2.4 Cálculo del Inversor a implementar en la piscifactoría. ....	35
4.3 Análisis económico. ....	36
4.3.1 Costos de instalación de energía eólica. ....	37
4.3.2 Costos de instalación de energía solar.....	38
4.3.3. Estudio de factibilidad económica. ....	39
Capítulo 5 Conclusiones. ....	41
Lista de referencias .....	42

### Lista de tablas

Tabla I Ventajas y desventajas del aerogenerador.....	17
Tabla II Parámetros de forma y de escala para cada mes.....	28
Tabla III Factor de planta y Energía generada para cada mes.....	30
Tabla IV Datos encontrados para el periodo de 1 año.....	31
Tabla V Consumo de energía de la piscifactoría. ....	32
Tabla VI Numero de paneles solares necesarios para suplir el 100%, 50% y 25% de la demandan. ....	35
Tabla VII Configuración y supuestos de diseño.[12] .....	38
Tabla VIII Costo de capital de las diferentes configuraciones.....	38
Tabla IX Porcentaje que ocupa el sistema eólico y solar.....	39
Tabla X Demanda y costos mensuales de energía eléctrica con el sistema hibrido conectado a la red. ....	40

### Lista de figuras

Figura 1 Turbina de eje horizontal.....	12
Figura 2 Turbina de eje vertical. ....	12
Figura 3 Componentes de un Aerogenerador. ....	13
Figura 4 . Partes básicas de un sistema eólico pequeño.[3] .....	15
Figura 5 Generador de inducción con rotor de jaula de ardilla accionado por un rotor eólico de velocidad constante.....	16
Figura 6 Generador de inducción con rotor devanado con resistencia variable (GIRDRV). ....	16
Figura 7 Generador asíncrono de rotor devanado doblemente alimentado accionado por un rotor eólico de velocidad variable.[5] .....	17
Figura 8 Generador síncrono de imanes permanentes con convertidor. ....	17
Figura 9 Anemómetro tipo cazolet. ....	19
Figura 10 Grafica de la función de probabilidad de Weibull. ....	20
Figura 11 . Etapas de la curva de potencia contra velocidad de un aerogenerador.[2] .....	21
Figura 12 Celda, Modulo y Panel solar.....	24
Figura 13 Estructura de una celda solar. ....	24
Figura 14 Curva de potencia y curva I-V.[9] .....	25
Figura 15 Sistema aislado a la red.....	26
Figura 16 Sistema conectado a la red eléctrica. ....	27
Figura 17 Esquema para determinar el potencial eólico en la zona. ....	27
Figura 18 Grafica de densidad de frecuencia de los datos y aproximación de Weibull. ....	28
Figura 19 Curva de Potencia contra velocidad. ....	29
Figura 20 Curva de Potencia contra velocidad simulada. ....	30
Figura 21 Función de Weibull y datos de velocidad para todo el periodo de estudio (año). ..	31
Figura 22 Irradiación Solar horizontal media diaria.....	32
Figura 23 Datos de hora solar pico en Hobo-Huila. ....	33
Figura 24 Hora solar pico. ....	33
Figura 25 Panel LG Solar MonoX Neon y Black con sus respectivos datos. ....	34

Figura 26 Inversor INVERSOR SDS-250 kW .....	36
Figura 27 Sistema Eólico solar conectado a la red. ....	36
Figura 28 Generación del sistema híbrido con respecto a el consumo de energía del año 2017 .....	39

## Capítulo 1

### Introducción

Con el rápido desarrollo de la economía global, la demanda de energía se ha incrementado notablemente a nivel mundial. Por otro lado, la necesidad de mitigar los efectos ambientales adversos por la utilización de combustibles fósiles, la volatilidad de los precios de los combustibles y la mejora en la calidad de vida, han impulsado un importante crecimiento en la generación de la energía renovable en todo el mundo.[1].

En Colombia, actualmente se hace uso de energías que proviene de fuentes convencionales como es el caso de Hidroeléctricas y termoeléctricas, para satisfacer la demanda energética del país. En los últimos años se ha evidenciado el impacto del cambio climático en Colombia, un ejemplo son los periodos de lluvia y sequía. Tal situación ha impulsado a realizar estudios para encontrar otras fuentes energéticas que sean renovables, inagotables y amigables con el medio ambiente. Colombia es un país que cuenta con gran potencial energético, esto hace, que se desarrollen proyectos para la implementación de energías renovables no convencionales como es el caso del parque eólico JEPÍRACHI 1 y la granja solar YUMBO.

En el presente proyecto se estudiará dos tipos de energías renovables, la energía eólica y la energía solar, donde se estudiará su funcionamiento, las partes que lo componen y poder determinar el potencial energético de estas dos tecnologías en la zona de estudio.

### 1.1 Definición del problema

La energía ha cobrado un papel importante en la sociedad y su desarrollo; hoy día es prácticamente la base del funcionamiento económico y productivo en el ámbito mundial. En la actualidad, se ha desarrollado una crisis energética la cual ha afectado la mayor parte del mundo, un ejemplo es el aumento de los costos de la energía eléctrica, de esta forma ha surgido un gran interés por buscar alternativas que permitan reducir estos costos. Una de las alternativas es la implementación de energía renovables no convencionales (solar, eólica, geotérmica, etc.) la cual puede ser aprovechada para ser convertida en energía eléctrica. Colombia al ubicarse en la zona ecuatorial y contar con climas y ecosistemas variados cuenta con un gran potencial para el desarrollo de energías limpias, hoy por hoy se están realizando a cabo proyectos en generación eólica y solar lo cuales son dos campos de gran interés en el ámbito nacional.



La necesidad de la energía se encuentra sujeta a las condiciones de crecimiento de la población, del desarrollo económico y del desarrollo tecnológico. Igualmente, el uso de las energías fósiles a lo largo de las décadas ha llevado a problemas ambientales, calentamiento global, lluvia ácida y cambio climático; problemas que pueden llevar a afectar el equilibrio ecológico y el bienestar social. Hoy en día los costos de generación de los combustibles fósiles han aumentado por los altos precios del combustible. Esto lleva a considerar la implementación de las energías renovables no convencionales ya que son apreciadas y están tomando un rol en la política energética.

Para este proyecto se pretende determinar la viabilidad y rentabilidad de un sistema híbrido solar eólico en una zona destinada a la piscicultura situada en el municipio de Hobo-Huila, esta empresa ha venido desarrollando actividades económicas con un crecimiento continuo, esto permite predecir que a medida que avance la empresa, la demanda de energía y los gastos por el suministro del servicio serán cada vez mayor, por esta razón se desea que el sistema pueda abastecer al sector e inyectar potencia al sistema. De esta manera, el municipio de Hobo podrá tener un impacto positivo en términos de imagen con la comunidad y el sector industrial, además de estudiar el uso de energías renovables no convencionales donde podrían ser aprovechadas con mayor factibilidad y poder replicar el proyecto a otras ciudades en caso de ser exitoso.

## 1.2 Justificación

Este proyecto está enfocado en la factibilidad de la implementación de energías renovables no convencionales en una piscifactoría situada en la zona de Hobo-Huila Colombia, con el fin de tener una mayor rentabilidad y reducir los altos costos de energía en el sector. Para este estudio se utilizó una estación meteorológica, para medir la velocidad del viento de la zona. Los datos de radiación se obtuvieron de la base de datos de la NASA con el fin de recolectar la mayor cantidad de datos posibles (1 año) y conocer si es viable la implementación de estos sistemas de generación en la zona. Al estudiar que tan factibles son las fuentes de energías renovables no convencionales se abre una oportunidad para aprovechar los recursos ambientales, con el fin de implementar estos sistemas y llegar a reemplazar las fuentes no renovables, las cuales causan perjuicios ambientales.

Uno de los problemas para desarrollar un estudio de factibilidad en una zona son los altos costos de inversión en el proyecto, esto hace que en muchas zonas de Colombia no se tengan registros de estudios para la implementación de los sistemas de energías renovables. El estudio de factibilidad técnica y económica en la zona de Hobo-Huila es algo que nunca se ha realizado por lo tanto no se tiene ninguna información o apoyo para este estudio. El objetivo es evaluar si es rentable invertir en tecnologías de energía solar y energía eólica en la zona.

Los resultados obtenidos servirán como base para el desarrollo de posteriores trabajos de investigación e implementación de tecnologías de aprovechamiento de recursos renovables no solo en el sector de Hobo-Huila, sino en cualquier otro sitio, el cual cuente con los recursos ambientales necesarios para obtener el mayor provecho y beneficiar a la comunidad e industrias aledañas al sector.

## 1.3 Objetivos

### 1.3.1 Objetivo general

- Realizar un estudio de factibilidad técnica y económica del uso de energía solar y eólica en el municipio de Hobo-Huila.

### 1.3.2 Objetivos específicos

- Analizar y cuantificar los costos y beneficios de la implementación de la micro red.
- Analizar los posibles beneficios económicos que tendría la piscifactoría al implementar los sistemas de energías renovables en dicha zona.
- Especificar los costos para la implementación del sistema eólico y solar.
- Utilizar el estudio como base para otros posibles proyectos en el ámbito municipal o departamental.

## 1.4 Metodología

Teniendo en cuenta que esta investigación se busca de forma planificada estimar el potencial energético del viento (energía solar) y el potencial energético de sol (energía solar), a partir de las mediciones de la velocidad del viento y la radiación solar. Por esta razón se deduce que la investigación es de tipo cuantitativa.

Para realizar el estudio, se planea dividir el presente proyecto en tres etapas: Recopilación de información, Análisis y procesamiento de datos y presentación de resultados.

Para la recopilación de información, es de suma importancia conocer el funcionamiento de las tecnologías que se irán a implementar, es importante hacer una descripción completa del funcionamiento de estos sistemas. Otro factor importante es tener una idea global de los precios actuales de estas tecnologías, para poder comparar precios y rendimiento, por último, estudiar el sector al cual se implementarán las tecnologías de energía eólica y energía solar, este estudio de zona relaciona la altura sobre el nivel de mar, la densidad del aire, la humedad relativa y la temperatura, este estudio se hace para tener una mayor claridad de la zona y si es conveniente o no invertir en tecnologías.

Análisis y procesamiento de datos: se procede a la toma de datos, velocidad del viento (anemómetro) y radiación solar (base de datos de la NASA). Se debe llevar un control para la toma de datos, esto hace que se tenga un mayor monitoreo con los sensores por si llegan a sufrir algún daño técnico y no se pierda información, estos datos serán anexados en herramientas de simulación como Matlab para poder procesar los datos y desarrollar sus respectivos cálculos.

Presentación de resultados: En esta actividad se calculará el potencial energético para los sistemas de generación eólica y generación solar en el municipio de Hobo-Huila. Con estos resultados se podrá deducir la factibilidad del proyecto y que tan rentable será en un futuro.

## 1.5 Estructura del trabajo

El trabajo de grado está estructurado de la siguiente forma:

En el Capítulo 2 se presenta primero el funcionamiento y las partes que componen un sistema eólico, en este se explica la diferencia entre los 2 tipos de turbinas que se encuentran en el mercado, también las ventajas y desventajas que tienen las diferentes clasificaciones de los generadores eléctricos. Para dicho capítulo se presenta la forma de recolección de datos y su procesamiento estadístico para poder calcular la energía que puede producir un sistema eólico. Posteriormente en el capítulo 3 se expone los diferentes componentes de un sistema fotovoltaico como las celdas solares, las baterías, los inversores y los reguladores de carga. También se muestra los diferentes tipos de instalaciones del sistema fotovoltaico. Seguidamente en el capítulo 4 se presenta los resultados de los dos sistemas, en este se muestra la selección de los equipos a utilizar para el proyecto, el procesamiento de los datos por medio de herramientas de programación, el cálculo de la energía mes a mes de cada sistema y el análisis financiero del proyecto. Por último, en el Capítulo 5 se presentan las conclusiones del proyecto.

## Capítulo 2

### Generación Eólica

La energía eólica es una fuente de energía renovable no convencional la cual aprovecha la energía cinética del viento, convirtiéndola a energía eléctrica. El principal medio para obtener la energía es por medio de aerogeneradores, donde por medio de sus aspas pueden capturar la energía del viento. Los aerogeneradores están compuestos por equipos eléctricos y mecánicos, los cuales trabajan en conjunto para poder convertir la energía del viento en energía eléctrica.

#### 2.1 Tipos de turbina.

Las turbinas suelen ser clasificadas de acuerdo con la disposición de su eje de rotación. Las más comunes son las turbinas de eje horizontal (Figura 1), que constan de una, dos o tres palas. Tienen la ventaja de que las palas están situadas a elevada altura, con lo cual la velocidad media del viento es mayor, y la intensidad de turbulencia es menor, que a nivel del terreno. También existen turbinas de eje vertical (Figura 2). Éstas tienen la ventaja de que no requieren mecanismos de orientación. Además, el generador y la caja de engranajes se encuentran a nivel del terreno, facilitando el montaje y mantenimiento, sin embargo, tienen una seria desventaja: el par aerodinámico varía fuertemente con la posición de las palas, aún con viento constante. Ésta es una importante causa de fatiga de las palas y del sistema de generación, y de serios problemas de calidad de la potencia suministrada.[2]

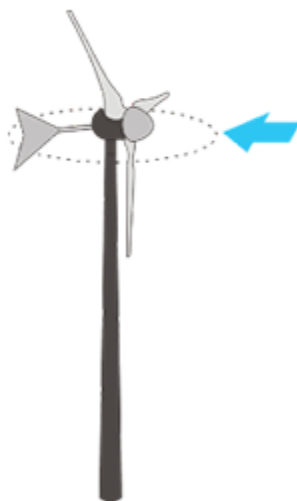


FIGURA 1 TURBINA DE EJE HORIZONTAL.

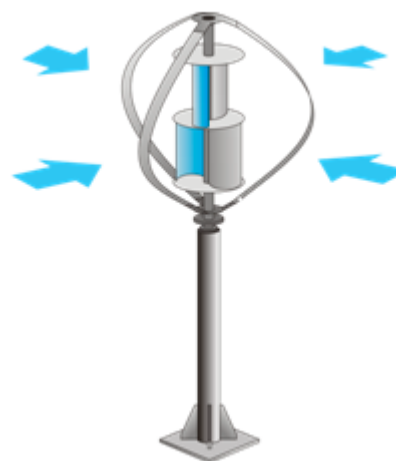


FIGURA 2 TURBINA DE EJE VERTICAL.

Dada la amplia difusión de los aerogeneradores, se ha establecido la siguiente clasificación entre ellos: se conocen como aerogeneradores grandes, aquellos equipos cuya potencia eléctrica nominal por unidad se encuentra entre 500 kW y algunos megavatios. Se conocen como equipos medianos aquellos cuya potencia nominal se encuentran entre 100 kW y 500 kW. Las turbinas pequeñas son aquellas cuya potencia se halla entre las decenas de Kilovatios y los 100 kW y las turbinas eólicas micro, aquellas con potencia nominal inferior a 10 kW.

## 2.2 Turbinas eólicas grandes

Las turbinas eólicas grandes suelen utilizarse en sistemas de generación eléctrica a gran escala y en granjas eólicas, estas estaciones se pueden localizar en tierra o en el mar. Estas turbinas están conformadas por los siguientes equipos que se aprecian en la Figura 3.



**FIGURA 3 COMPONENTES DE UN AEROGENERADOR.**

**La góndola:** Es la parte física que contiene los componentes claves del aerogenerador, como el multiplicador y el generador eléctrico. Para aerogeneradores de gran tamaño el personal de servicio puede acceder a la góndola desde la torre de la turbina para cuestiones de mantenimiento.

**Palas del rotor:** Las palas tienen la función de recoger la energía del viento, convertir este movimiento en un movimiento de rotación y esta energía es transmitida al buje. La mayoría de las modernas palas de rotor de grandes aerogeneradores están fabricadas con plástico reforzado con fibra de vidrio ("GRP").

**El buje:** Es una pieza cilíndrica que transmite la potencia del viento a el eje lento o de velocidad baja.

**El eje de velocidad baja:** El eje de baja velocidad conecta el buje del rotor al multiplicador. En el interior del eje discurren conductores del sistema eléctrico o hidráulico, para accionamiento de los frenos aerodinámicos y del control de los sensores del rotor.

**El multiplicador (gearbox):** Es un elemento que a su entrada se encuentra el eje de baja velocidad y mediante un sistema de engranajes, consigue que el eje de salida gire a mayor revolución (50 veces más rápido).

**Eje de alta velocidad:** Gira a una velocidad alta lo que permite el funcionamiento del generador eléctrico. Este eje cuenta con un freno de disco mecánico de emergencia, este se utiliza en caso de que falle el freno aerodinámico o para realizar el mantenimiento de la turbina.

**Generador eléctrico:** Conceptualmente, un generador eléctrico es un sistema que convierte la energía mecánica (rotación de un eje a una cierta velocidad y con un cierto par) en energía eléctrica (que se transmite por un circuito eléctrico). Los generadores empleados pueden ser de inducción o generador sincrónico. El uso de estos depende de las características del viento y del nivel de potencia que se necesita generar.

**Mecanismos de orientación:** El mecanismo de orientación de un aerogenerador es utilizado para girar el rotor de la turbina en contra del viento. Existen mecanismos de orientación como las veletas para aerogeneradores de baja potencia y para aerogeneradores de alta potencia se utilizan motores auxiliares, que funcionan de forma automática orientando el rotor en la dirección adecuada.

**Controlador electrónico:** El controlador electrónico consta de varios ordenadores que continuamente supervisan las condiciones de la turbina eólica, y recoge estadísticas de su funcionamiento. El controlador también controla un gran número de bombas hidráulicas, válvulas y motores dentro de la turbina, esto es importante y de gran ayuda, ya que por medio del controlador se puede conocer el funcionamiento del aerogenerador y de esta forma comunicarse con el operador de la turbina para que realice las maniobras necesarias para tener un buen funcionamiento a la hora de presentarse alguna falla en el sistema.

**Sistema de refrigeración:** Los generadores necesitan refrigeración durante su funcionamiento. En la mayoría de las turbinas la refrigeración se lleva a cabo mediante encapsulamiento del generador en un conducto, utilizando un gran ventilador para la refrigeración por aire, aunque algunos fabricantes usan generadores refrigerados por agua. Los generadores refrigerados por agua pueden ser contruidos de forma más compacta, lo que también les proporciona algunas ventajas en cuanto a rendimiento eléctrico se refiere, aunque precisan de un radiador en la góndola para eliminar el calor del sistema de refrigeración por líquido.

**La torre:** Esta parte del aerogenerador, es la estructura la cual soporta la góndola y el rotor. Las torres pueden ser de tipo tubular de acero, de celosía y torres de mástil tensado con cables. Las torres tubulares de acero suelen ser utilizadas para grandes aerogeneradores, donde son fabricadas en secciones con bridas en cada uno de los extremos y son unidas por pernos. Estas torres son de forma troncocónicas, con el fin de aumentar su resistencia y al

mismo tiempo ahorrar material. Las torres celosía son estructuras con barras interconectadas, la ventaja básica de las torres de celosía es su costo comparada con la torre tubular de acero. Las torres de mástil tensado con viento suelen ser utilizadas en aerogeneradores pequeños, esta estructura esta sostenida por cables tensores. Una de las ventajas es el ahorro de peso y, por lo tanto, de costo.

## 2.3 Turbinas eólicas micro.

Estos sistemas por lo general están compuestos por un rotor, un generador o alternador montado en una estructura, una cola (usualmente), una torre, el cableado, y los componentes del “sistema de balance”: controladores, inversores y las baterías como se aprecia en la Figura 4. A través del giro de los alabes la turbina convierte la energía cinética del viento en un movimiento rotatorio que acciona el generador. [3]

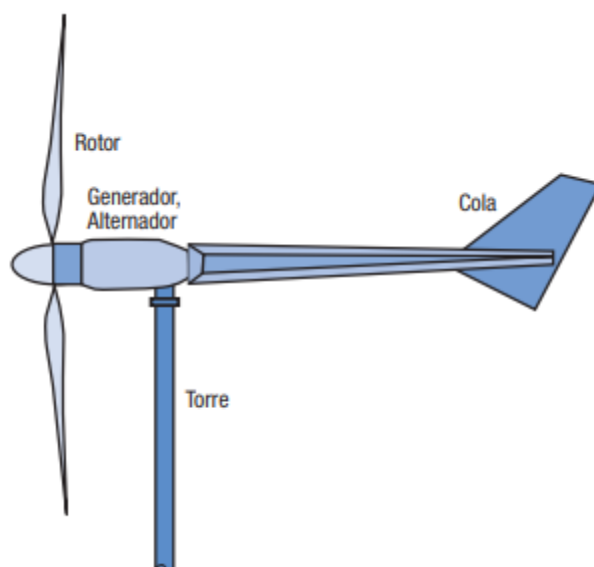


FIGURA 4 . PARTES BÁSICAS DE UN SISTEMA EÓLICO PEQUEÑO.[3]

## 2.4 Clasificación de los generadores eléctricos en aerogeneradores.

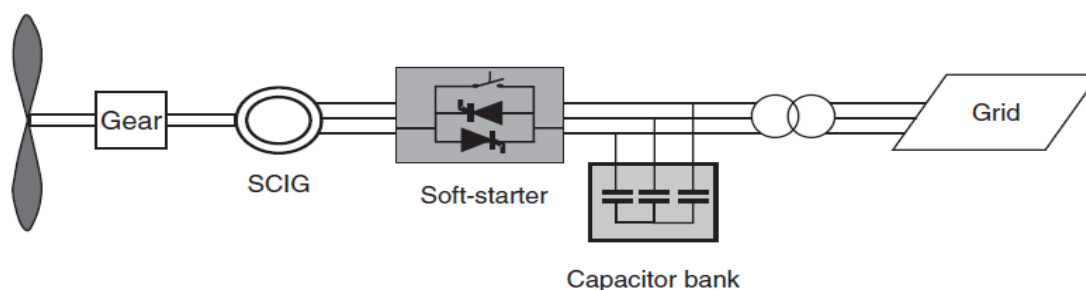
La generación eléctrica en un aerogenerador puede realizarse a través de generadores asíncronos o de inducción y generadores síncronos. En el caso de los generadores encontramos los de rotor en jaula de ardilla, rotor devanado con resistencia variables y rotor de vanado doblemente alimentado.

**Tipo A** (Generador de inducción con rotor en jaula de ardilla “GIRJ”):

En este sistema el rotor de la turbina eólica se encuentra acoplado al eje del generador a través de una caja de engranajes de relación fija como se aprecia en la Figura 5. El generador

es de inducción con rotor de jaula. Algunos generadores de inducción usan configuraciones de bobinados de polos ajustables para permitir una operación a distintas velocidades sincrónicas. En cualquier punto de operación esta configuración tiene que funcionar a velocidad constante.[4]

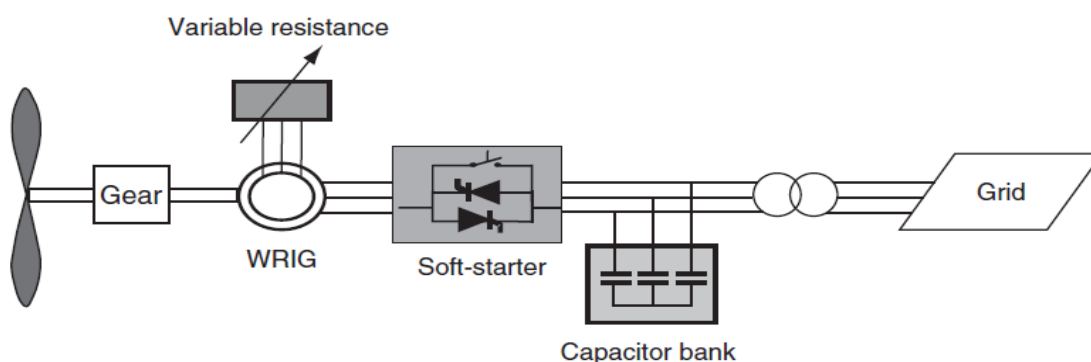
Este tipo de generador eléctrico consume potencia reactiva, que puede absorber de la red, por lo tanto, en este sistema se instalan banco de capacitores variables facilitando la regulación de potencia reactiva.



**FIGURA 5 GENERADOR DE INDUCCIÓN CON ROTOR DE JAULA DE ARDILLA ACCIONADO POR UN ROTOR EÓLICO DE VELOCIDAD CONSTANTE.**

**Tipo B** (Generador de inducción con rotor devanado y resistencia variable “GIRDRV”):

El sistema utiliza un motor de inducción con rotor bobinado a velocidad variable, y un rotor eólico a velocidad variable con regulación activa, multiplicadora y compensación de energía reactiva como se observa en la Figura 6. El control se realiza por medio de la variación de la resistencia del rotor, en un intervalo de variación de velocidad del 2-5%. El sistema trabaja con velocidad de giro variables con estrecho margen de variación.



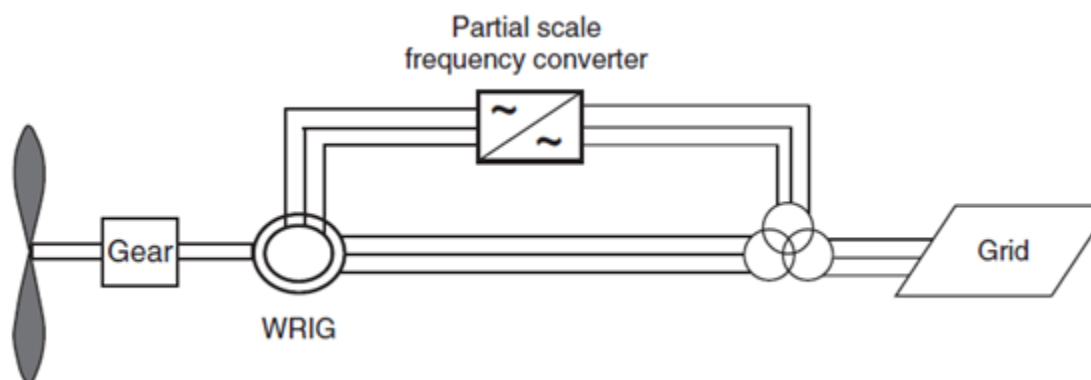
**FIGURA 6 GENERADOR DE INDUCCIÓN CON ROTOR DEVANADO CON RESISTENCIA VARIABLE (GIRDRV).**

**Tipo C** (Generador de inducción con rotor doblemente alimentado “GIRDA”):

El principio de funcionamiento del GIRDA se basa en inyectar en el rotor corriente trifásica de amplitud, frecuencia y fase variable, mientras que el estator se acopla a la red de frecuencia



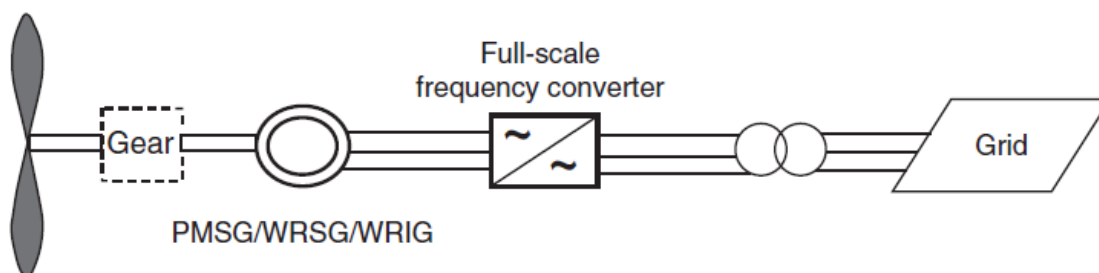
constante (50 o 60 Hz) a través de un transformador y el rotor devanado está provisto de un convertidor, que se instala entre el rotor y la red como se observa en la Figura 7.[5]



**FIGURA 7 GENERADOR ASÍNCRONO DE ROTOR DEVANADO DOBLEMENTE ALIMENTADO ACCIONADO POR UN ROTOR EÓLICO DE VELOCIDAD VARIABLE.[5]**

**Tipo D** (Generadores síncronos con imanes permanentes “GSIP”):

Se trata de un aerogenerador síncrono sin escobillas con regulación y con un convertidor para la totalidad de la potencia del generador. La máquina trabaja a velocidad variable y el control se realiza por cambio de frecuencia por el convertidor. En la Figura 8 se muestra el esquema eléctrico de un aerogenerador de este tipo.



**FIGURA 8 GENERADOR SÍNCRONO DE IMANES PERMANENTES CON CONVERTIDOR.**

En la Tabla I se aprecia las ventajas y desventajas que tiene cada tipo de aerogenerador:

**TABLA I VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL AEROGENERADOR.**

<b>Tipo A: Velocidad Constante</b>	<b>Tipo C: Doblemente Alimentado</b>	<b>Tipo D: Full conversión AC/DC/AC</b>
Simple y Robusto, Menos eficiente aerodinámicamente	Aerodinámicamente eficiente	Aerodinámicamente eficiente

Menos costoso	Costoso	Costoso
Eléctricamente eficiente	Menos stress mecánico	Menos stress mecánico
Generador estándar	Convertidor pequeño, Generador estándar	Convertidor grande
Necesita caja de engranajes	Necesita caja de engranajes	No necesita caja de engranajes

## 2.5 Medición y tratamiento de los datos de la velocidad del viento

La velocidad del viento está siempre variando en el tiempo, por lo tanto, el contenido energético del viento varia continuamente por esta razón para conocer la viabilidad del viento como fuente de energía, se requiere conocer sus características aplicando técnicas estadísticas para su análisis. En el proceso de caracterización intervienen los siguientes aspectos:

- Toma de datos: en este aspecto se adquiere la velocidad y dirección del viento con una frecuencia de muestreo para un periodo tiempo.
- Método de medición: tipos de aparatos para la toma de datos.

Para la toma de datos se utilizan equipos de medición para la velocidad y la dirección del viento, es el caso de los anemómetros, lo cuales tiene incorporado una veleta para indicar la dirección del viento. Los equipos de medición deben ubicarse en lugares despejados y a una altura apropiada. La ubicación del anemómetro es muy importante ya que ira a hacer la futura localización de la turbina. Esto evita la incertidumbre que conlleva a recalcular la velocidad del viento a una diferente altura. Las señales captadas por los sensores de medición se envían a un sistema de registro de datos, para luego extraer la información y estudiar los datos.

Los anemómetros más utilizados son los de rotación tipo cazoleta como se observa en la siguiente Figura 9.



**FIGURA 9 ANEMÓMETRO TIPO CAZOLE.**

Los anemómetros tipo cazoleta tiene alrededor de tres a cuatro cazoletas cónicas distribuidas simétricamente alrededor de un eje vertical móvil. Están diseñados para girar a la misma velocidad del viento. El anemómetro va dotado de un transductor que convierte la velocidad de giro del sensor en una señal eléctrica que permite el registro de los datos. En estaciones más avanzadas, los datos se capturan, se guardan en un registro de datos (data logger) y periódicamente se recogen para su posterior tratamiento. Los datos arrojados por los sensores tienen un rango de medida, el límite inferior de la velocidad que es capaz de captar la mayoría de lo anemómetro es de 0,3 m/s (umbral de calma). Para velocidades de viento muy alta (ráfagas), algunos sensores entran en un estado de bloque para no dañar los dispositivos de medición.[5]

## 2.6 Potencial Eólico

Aunque la dirección e intensidad del viento son magnitudes estocásticas, es decir, tienen un comportamiento no determinista, se pueden tratar muy bien mediante variables estadísticas. Una forma muy común de caracterizar la velocidad del viento en un emplazamiento es mediante una distribución de probabilidad, usando normalmente la distribución de Weibull.[5]

La distribución de Weibull (1) es una distribución de probabilidad continua, en la cual permite calcular el potencial energético y la energía anual del viento que puede producir un aerogenerador. La distribución de probabilidad del viento se asemeja a la función de densidad de probabilidad de Weibull. La función de densidad de Weibull está en función de dos parámetros, el parámetro de escala “c” que determina la velocidad promedio del viento en el lugar o zona de estudio y el parámetro de forma “K” que indica el grado de dispersión de los registros como se aprecia en la siguiente ecuación:

$$p(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \quad (1)$$

donde:

$v$ = velocidad del viento en m/s.

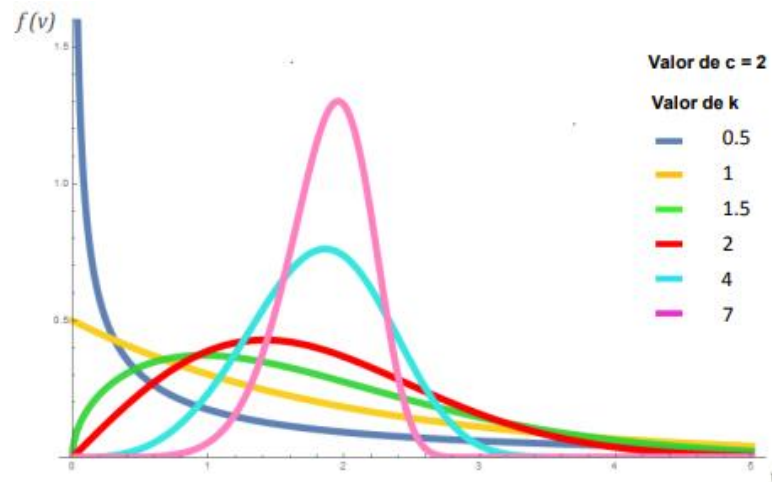
$p(v)$ = función de densidad de probabilidad de Weibull.

$c$ = Factor o parámetro de escala (m/s).

$k$ = Factor o parámetro de forma.

Debido a estos dos parámetros ajustables, la gráfica de distribución de Weibull puede tomar formas muy variadas, lo que confiere gran capacidad a la hora de adaptarse a las diferentes formas de los datos. En la Figura 2.6 se representa la distribución para valores del factor de escala ( $c$ ) constante y diferentes valores del factor de forma ( $k$ ).

La grafica de la función de densidad de Weibull varía su forma dependiendo de los parámetros encontrados. Por ejemplo, para un factor de escala de 1 y variando el parámetro de forma “ $k$ ” se obtienen las siguientes graficas (Ver Figura 10). Se puede apreciar en la gráfica que para valores de  $k$  menores a 1 corresponden a un régimen de viento altamente variado, para valores alrededor de 2 el régimen presenta cambios moderados, mientras que para valores superiores a 3 corresponde a vientos más regulares.



**FIGURA 10 GRAFICA DE LA FUNCIÓN DE PROBABILIDAD DE WEIBULL.**

Para el cálculo de los parámetros de la función Weibull, existen algunos métodos para calcular dichos parámetros, estos métodos difieren de los datos que se encuentran disponibles. Si es el caso en el cual se conoce todos los datos de velocidad de viento para el tiempo de estudio, los parámetros de escala y forma se pueden calcular por un ajuste de mínimos cuadrados mediante la función de distribución acumulativo (2).

$$F(v) = 1 - e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \quad (2)$$

Aplicando dos veces el logaritmo a la ecuación anterior se tiene:

$$\ln(1 - F(v)) = -\left(\frac{v}{c}\right)^k \rightarrow \ln[-\ln(1 - F(v))] = k \ln v - k \ln c \quad (3)$$

Se procede a el ajuste por mínimos cuadrados a la recta:  $y = kX + B$ , en donde:

$$y = \ln[-\ln(1 - F(v))] \quad ; \quad X = k \ln v \quad ; \quad B = -k \ln c \quad (4)$$

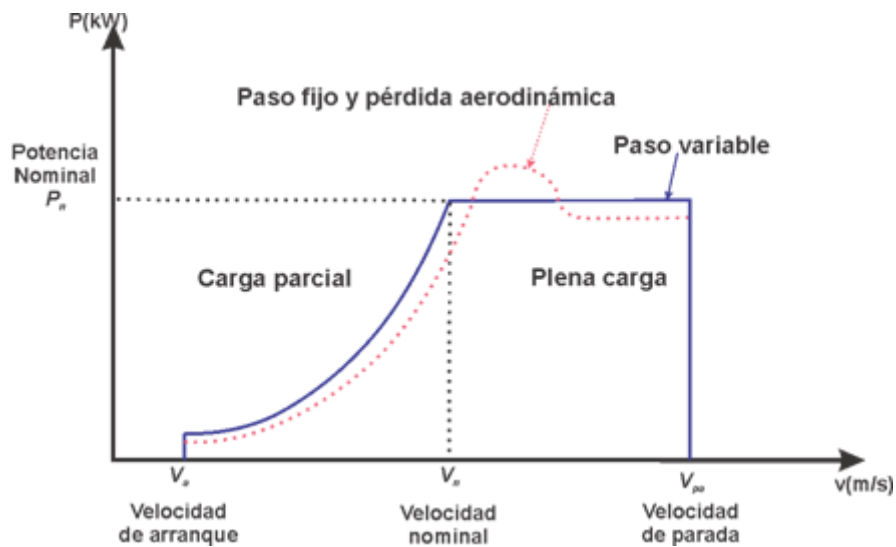
Calculada la recta por mínimos cuadrados; su pendiente proporciona el valor de  $k$  y el valor de  $c$  se obtiene a partir de la expresión:

$$c = e^{-\frac{B}{k}} \quad (5)$$

Es de aclarar que existen software para encontrar los parámetros de escala y forma.

## 2.7 Cálculo de la energía producida por un aerogenerador

La energía que puede producir un aerogenerador está ligada a muchos factores, uno de estos es la curva de potencia (P-v) del aerogenerador la cual es facilitada por el fabricante, en ella indica la velocidad de arranque ( $V_A$ ) en la cual el aerogenerador comienza a entregar potencia y aumenta hasta alcanzar la potencia o capacidad nominal del aerogenerador ( $P_N$ ) para la velocidad de viento ( $V_N$ ), a partir de esta valor, el sistema de regulación hace que la potencia se mantenga sensiblemente constante a la potencia nominal hasta la desconexión o parada ( $V_D$ ). (Ver Figura 11).



**FIGURA 11 . ETAPAS DE LA CURVA DE POTENCIA CONTRA VELOCIDAD DE UN AEROGENERADOR.[2]**

La energía producida de un aerogenerador durante un tiempo  $T$  viene dada por:

$$E = T \int_0^{\infty} p(v) P(v) dv \quad (6)$$

En donde:

$p(v)$  : Función densidad de probabilidad de velocidad.

$P(v)$  : Función que representa la curva de potencia frente a la de velocidad del aerogenerador.

$T$  : Periodo de tiempo.

En muchos aerogeneradores, una vez alcance la velocidad nominal, la potencia permanece prácticamente constante para el intervalo comprendidos entre la velocidad nominal ( $V_N$ ) y la de desconexión ( $V_D$ ) . por ende, la ecuación 2 queda expresada da la siguiente manera.

$$E = T \left( \int_{V_A}^{V_N} p(v) P(v) dv + P_n \int_{V_N}^{V_D} p(v) dv \right) \quad (7)$$

Se define la relación entre la energía suministrada por la turbina y lo que se generaría operando a la potencia nominal durante el número de horas de la evaluación del proyecto como factor de planta (ecuación 3)

$$factor\ de\ planta = F.P = \frac{E}{TP_n} \quad (8)$$

Donde:

$E$ = Energía entregada por la turbina.

$T$  = Tiempo de la evolución del proyecto.

$P_n$  = Potencia nominal de aerogenerador.

Igualando la ecuación 8 con la ecuación 7 se obtiene que:

$$F.P \times T \times P_n = T \left( \int_{V_A}^{V_N} p(v) P(v) dv + P_n \int_{V_N}^{V_D} p(v) dv \right) \quad (9)$$

$$F.P = \frac{1}{P_n} \left( \int_{V_A}^{V_N} p(v) P(v) dv + P_n \int_{V_N}^{V_D} p(v) dv \right) \quad (10)$$

$$F.P = \left( \int_{V_A}^{V_N} p(v) \frac{P(v)}{P_n} dv + \int_{V_N}^{V_D} \frac{p(v)}{P_n} dv \right) \quad (11)$$

Donde  $\frac{P(v)}{P_n} = P(v)_u$

Donde el factor de planta de una turbina eólica queda expresado como se aprecia en la ecuación 12.

$$F.P = \left( \int_{V_A}^{V_N} p(v) P(v)_u \, dv * \int_{V_N}^{V_D} \frac{p(v)}{Pn} \, dv \right) \quad (12)$$

## Capítulo 3

### Generación Solar

La energía solar se define como aquella proveniente del sol mediante radiación la cual es recibida en la tierra, es una fuente de energía que tiene importantes ventajas sobre otras y que, para su aprovechamiento, también presenta varias dificultades. Entre sus ventajas se destacan principalmente su naturaleza inagotable, renovable y su utilización libre de polución. Pero, para su utilización, es necesario tener en cuenta su naturaleza intermitente, su variabilidad fuera del control del hombre y su baja densidad de potencia. Estas dificultades conllevan entonces la necesidad de transformarla a otra forma de energía para su almacenamiento y posterior uso. La baja densidad de potencia resulta en que es una fuente extensiva: para mayor potencia, mayor extensión de equipos de conversión. La ingeniería solar precisamente se ocupa de asegurar el suministro confiable de energía para el usuario teniendo en cuenta estas características.[6]

La energía solar que corresponde a la recibida directamente del sol en forma de radiación electromagnética puede ser aprovechada de dos formas dependiendo de la tecnología utilizada: energía solar fotovoltaica o energía solar térmica. La fotovoltaica utiliza la radiación solar y aprovecha las propiedades físicas de ciertos materiales semiconductores para generar electricidad, mientras la energía térmica utiliza directamente la energía recibida del sol para calentar un fluido de trabajo y utilizarlo por ejemplo en un ciclo termodinámico convencional. [7]

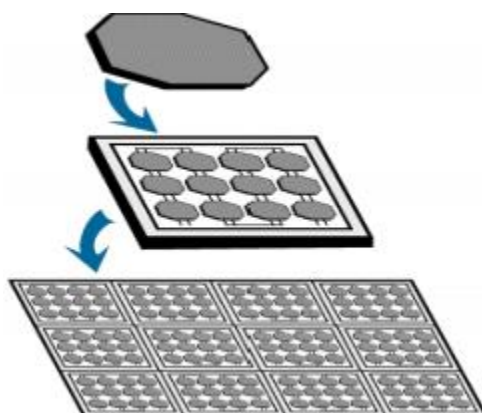
### 3.1 Sistema fotovoltaico

Un sistema fotovoltaico es un conjunto de elementos o dispositivos que aprovechan la radiación solar para convertir en la energía eléctrica. Este sistema utiliza un conjunto de celdas fotovoltaicas, las cuales se fabrican principalmente de silicio, el segundo elemento más abundante en la corteza terrestre, un control de carga, inversor y almacenadores de energía.

### 3.2 Componentes de un sistema fotovoltaico

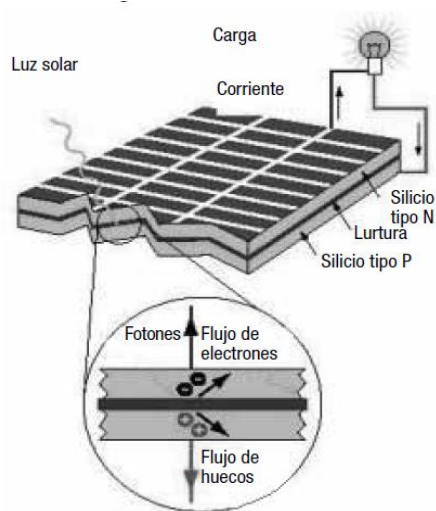
**Las celdas solares** son dispositivos que absorben energía de los fotones presentes en la luz, que incide sobre ellas y la convierte en energía eléctrica. El funcionamiento de una celda solar consiste en que la luz solar caliente la superficie de la celda, esto ocasiona desplazamiento de electrones y generan un flujo de corriente eléctrica. El total de electricidad producida por el dispositivo dependerá de la cantidad de luz que incida sobre la celda y de su eficiencia. Las celdas solares se instalan junto con otras para construir módulos como se aprecia en la Figura

3.2.a, los cuales a su vez juntos forman paneles, con el fin de producir cantidades significativas de energía eléctrica.



**FIGURA 12 CELDA, MODULO Y PANEL SOLAR**

Las partes más importantes de la célula solar son las capas de semiconductores, ya que es donde se crea la corriente de electrones. Estos semiconductores son especialmente tratados para formar dos capas de diferente dopados (tipo P y tipo N) para formar un campo eléctrico, positivo en una parte y negativo en la otra. Cuando la luz solar atraviesa la célula se liberan electrones que pueden ser atrapados por el campo eléctrico, formando una corriente eléctrica. Debido a estas propiedades las células se fabrican de este tipo de materiales ya que actúan como aislantes a bajas temperaturas y como conductores cuando se aumenta la energía, ver Figura 13.[8]



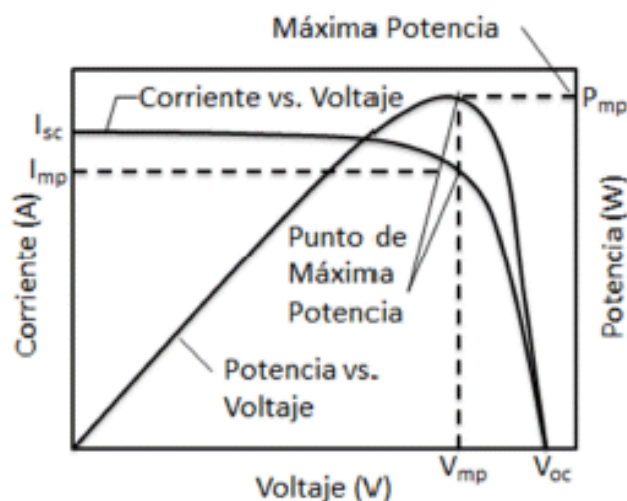
**FIGURA 13 ESTRUCTURA DE UNA CELDA SOLAR.**

Existen diferentes tipos de celdas solares en el mercado, están los de **Silicio Monocristalino**, este tipo de panel está constituido principalmente de cristales puros de silicio con una



eficiencia entre el 15% hasta el 17%, son considerados los más eficientes. Sin embargo, su costo es el más elevado. Están los de **Silicio Policristalino**, estos son construidos de silicio, pero con una estructura más aleatoria, por ende, son menos eficientes (12%-14%), pero más económicos a la hora de su fabricación. Por último, están los de materiales amorfos, son construidos de silicio sin una estructura cristalina. Son muy económicos, pero poco eficientes (10%).

La curva característica de un módulo fotovoltaico relaciona la intensidad de corriente con la tensión del módulo, lo que traduce a una curva de potencia como se aprecia en la Figura 14.



**FIGURA 14 CURVA DE POTENCIA Y CURVA I-V.[9]**

En esta curva se puede observar que cuando el voltaje es cero, la corriente está en su máximo valor (no existe diferencia de potencial), en cambio cuando el voltaje es máximo, la corriente es igual a cero (no existe flujo de electrones), estos valores se denominan corriente de cortocircuito ( $I_{sc}$ ) y voltaje de circuito abierto ( $V_{oc}$ ), respectivamente. La corriente de corto circuito varía con relación a la radiación del sol y el área de las celdas; el voltaje de circuito abierto está determinado por las propiedades del material semiconductor, la iluminación y la temperatura, si la temperatura de la celda aumenta, el valor de voltaje de circuito abierto disminuye. Entre los puntos de la curva también se encuentra el punto de máxima potencia (MPP), que es el máximo valor resultante del producto entre la corriente y el voltaje, como se observa en la ecuación 13.

$$P_{mp} = V_{mp} * I_{mp} \quad (13)$$

**Las Baterías electroquímicas de ciclo profundo**, son un tipo de baterías las cuales están diseñadas para aplicaciones que requieren un drenado de corriente profundo y repetitivo como es el caso de un Sistema fotovoltaico. Las baterías juegan un rol fundamental cuando forma parte de un sistema aislado o no conectado a la red. El tiempo que demora una batería en descargarse hasta el mínimo para luego cargarse hasta el 100% de su capacidad se conoce

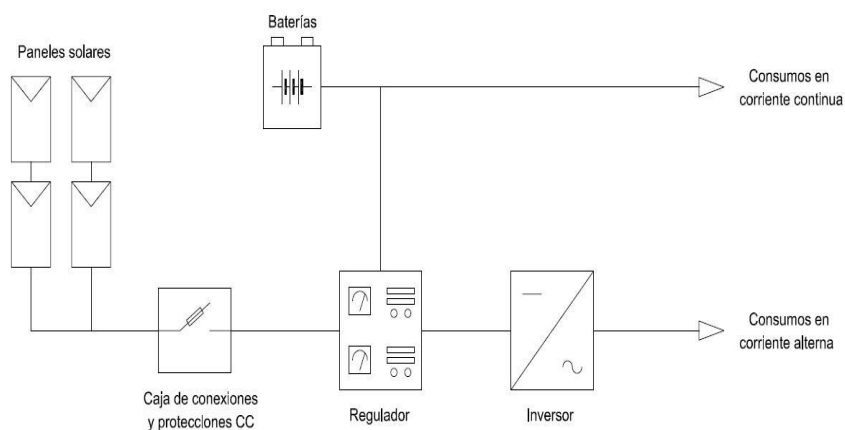
como “ciclo”. Se llaman baterías de ciclo profundo porque están diseñadas para resistir descargas de hasta un 80% de su capacidad total.

**Los Inversor**, son dispositivos los cuales convierten la corriente continua (DC) de baja tensión en corriente alterna de alta tensión (110v, 220v). En el convertidor CD/CA, la fuente es de naturaleza continua proveniente de baterías y la salida es una fuente alterna de voltaje fijo o variable y de baja frecuencia fija o variable. Los inversores se pueden clasificar en dos tipos: Inversores monofásicos e inversores trifásicos. Cada tipo de inversores puede utilizar dispositivos con activación y desactivación controlada (BJT, MOSFET, IGBT y GTO) o tiristores de conmutación forzada, según la aplicación. Estos inversores utilizan por lo general señal de control PWM, para producir un voltaje de salida en AC.[10]

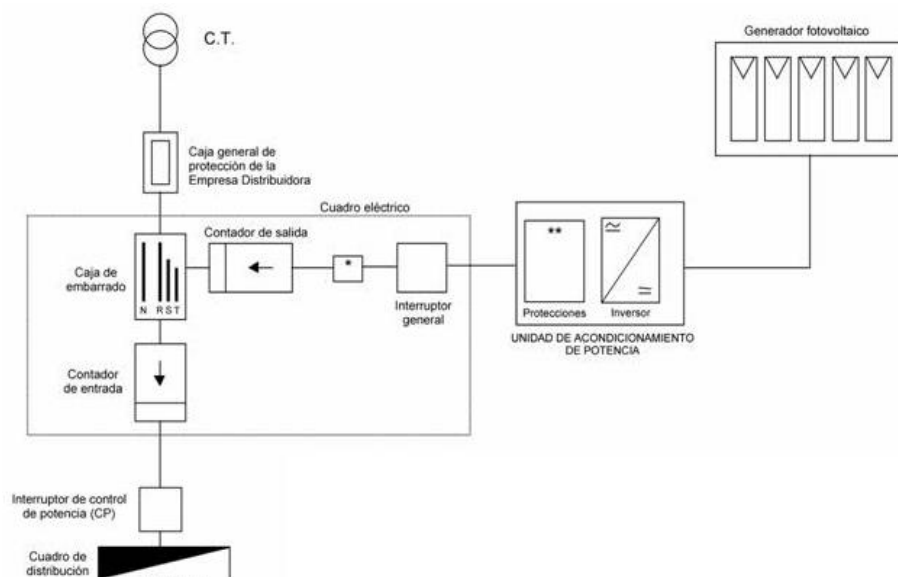
**Los reguladores de carga** tienen como objetivo principal proteger a las baterías frente a cargas y descargas demasiado profundas. Controla constantemente el estado de carga de las baterías y la profundidad de descarga, aumentando de esta forma su vida útil.[7]

### 3.2 Tipos de instalación de un sistema fotovoltaico

Las instalaciones fotovoltaicas se dividen de acuerdo con su objetivo. Para instalaciones separadas de la red eléctrica, se implementa **la instalación aislada a la red** (Figura 15) que son las que cumplen la función de satisfacer total o parcialmente los requerimientos de energía eléctrica de viviendas o localidades que no cuentan con servicio eléctrico y las **instalaciones conectadas a la red eléctrica** (Figura 16), son aquellas que se encuentran conectadas en paralelo con la red y sirven para reducir el consumo de energía eléctrica convencional ya sea por los altos costos de consumo o por el mal servicio de energía, optando por satisfacer la demanda por medio del sistema fotovoltaico y si es posible, entregar a la red eléctrica parte de la energía generada y que no es ocupada en el lugar de la instalación (excedente).



**FIGURA 15 SISTEMA AISLADO A LA RED.**

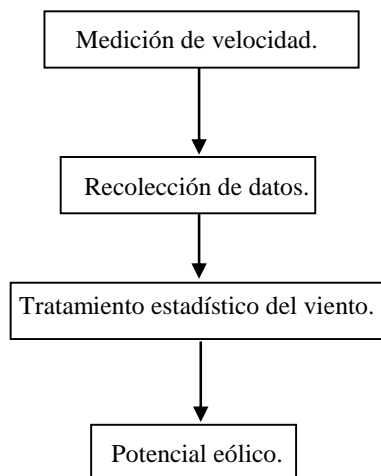


**FIGURA 16 SISTEMA CONECTADO A LA RED ELÉCTRICA.**

## Capítulo 4 Resultados

### 4.1 Potencial energético eólico en Hobo-Huila.

Para el desarrollo de estudio, se desarrolló un esquema a seguir para poder determinar el potencial de energía que se puede obtener de la zona como se observa en la Figura 17.



**FIGURA 17 ESQUEMA PARA DETERMINAR EL POTENCIAL EÓLICO EN LA ZONA.**

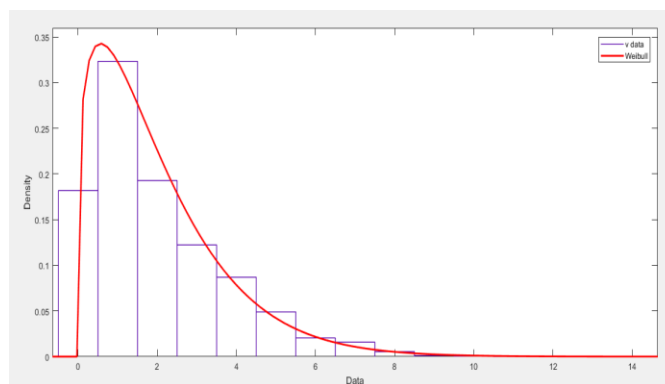
### 4.1.2 Medición de velocidad.

Para la medición de velocidad, se utilizó una estación meteorológica solar MA 3081. Esta estación se configuro para recolectar datos de viento cada 15 minutos. Los datos medidos eran enviados a través de radio frecuencia inalámbrica a una consola, la cual fue ubicada a 80 metros de la estación meteorológica. Los datos se extraían cada mes para hacer su respectivo tratamiento.

### 4.1.3 Recolección de datos y tratamiento estadístico

Para la recolección de los datos, se descargaron las mediciones de velocidad de viento de cada mes a el computador, estos datos fueron anexados en Excel para llevar un control de forma ordenada. Luego de tener los datos de velocidad de viento de cada mes se anexaron en Matlab mediante un vector y se creó un código para reemplazar los valores de velocidad de 0 m/s por 0.3 m/s, esto se debe a que la herramienta de Matlab para encontrar los parámetros de la distribución de Weibull funciona con velocidades mayores que 0.

Mediante la herramienta Distribution Fitter, se anexaron los datos de velocidad de viento en la opción Data y se creó un nuevo ajuste (New fit) en donde se escogió la distribución que más se asemeja al comportamiento de los datos de velocidad de viento obtenidos en la zona como se aprecia en la Figura 18, para este caso se selecciona la distribución de Weibull y se calcularon los parámetros de escala (A) y de forma (B) para cada mes como se observa en la Tabla II.



**FIGURA 18 GRAFICA DE DENSIDAD DE FRECUENCIA DE LOS DATOS Y APROXIMACIÓN DE WEIBULL.**

**TABLA II PARÁMETROS DE FORMA Y DE ESCALA PARA CADA MES.**

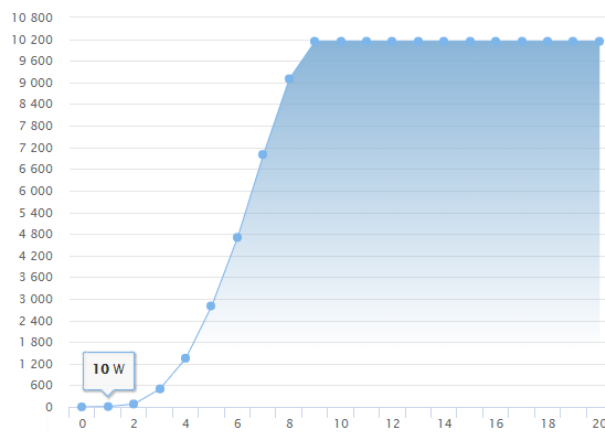
Mes	A (m/s)	B
Febrero	1,5477	1,2833
Marzo	1,3531	1,33
Abril	1,9358	1,2655
Mayo	1,8818	1,2857
Junio	2,8927	1,4456
Julio	3,8005	1,5239
Agosto	3,0981	1,6327

Septiembre	3,1948	1,5871
Octubre	2,5281	1,3577
Noviembre	1,5071	1,3989
Diciembre	1,2529	1,3734
Enero	1,3093	1,3286

#### 4.1.4 Cálculo de energía Eléctrica mensual y anual.

Para el cálculo del potencial eólico de cada mes, primero se indagaron diferentes tipos de turbinas eólicas (eje vertical y eje horizontal). Para la selección de la turbina se tuvo en cuenta la velocidad inicial la cual la turbina comienza a genera y la velocidad a la que llega a la potencia nominal. Esto se debe a que los datos obtenidos en la Tabla II de velocidad son bajos

Se selección el aerogenerador de minieólica E200L de la marca enair, está turbina de eje horizontal, con una potencia nominal de 10kW y un sistema trifásico de 500 v fue diseñada para cubrir las demandas energéticas de pequeñas industrias. La turbina a una velocidad de 1 m/s comienza a generar 10 w hasta llegar a su potencia nominal de 10140 w a una velocidad de 9 m/s como se aprecia en la Figura 19.



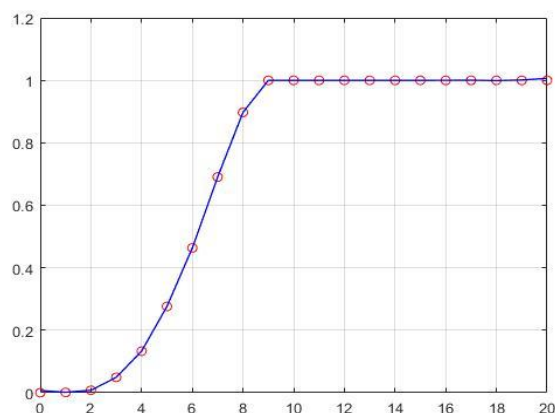
**FIGURA 19 CURVA DE POTENCIA CONTRA VELOCIDAD.**

Para el cálculo del factor de planta de cada mes se reconstruyó la gráfica de la Figura 19 mediante la herramienta de Matlab para poder determinar la función matemática que más se asemeje al comportamiento de la curva de potencia y de velocidad del aerogenerador E200L (Ver Figura 20).

Ya con la curva definida se procedió a encontrar la ecuación de la curva de la Figura 20 que más se asociar a los puntos de los datos.

$$f(x) = 0.144 \sin(0.558x + 2.506) + 1.077 \sin(0.117x - 0.135) + 0.0126 \dots \quad (14)$$

$$\dots \sin(1.221x + 3.966) + 0.0551 \sin(0.821x + 1.567) + 0.044 \sin(0.24x + 3.1)$$



**FIGURA 20 CURVA DE POTENCIA CONTRA VELOCIDAD SIMULADA.**

Para encontrar el factor de planta, se resolvió la integral definida por medio de la herramienta MuPAD de Matlab. Primero se definió la función del comportamiento de la turbina  $f(x)$  y la función de Weibull  $w(x)$  para cada mes, y se obtuvo los siguientes resultados que se aprecian en la tabla III.

Para el cálculo de la energía que puede producir la turbina en cada mes (ver Tabla III) se utilizó la fórmula de factor de carga o factor de planta, la cual define la relación de la energía generada por un aerogenerador durante un periodo dado y la que se hubiera producido si durante ese periodo hubiese estado funcionando continuamente a potencia nominal:

**TABLA III FACTOR DE PLANTA Y ENERGÍA GENERADA PARA CADA MES.**

Mes (2017)	Factor de Planta (%)	Tiempo (h)	Energía (kWh/mes)
Febrero	2,223	672	151,4985722
Marzo	1,435	744	108,2778321
Abril	4,246	720	309,9981096
Mayo	3,802	744	286,887987
Junio	9,805	720	715,9035765
Julio	17,685	744	1334,213725
Agosto	10,098	744	761,8442417
Septiembre	11,298	720	824,864018
Octubre	7,599	744	573,3010685
Noviembre	1,739	720	127,0297756

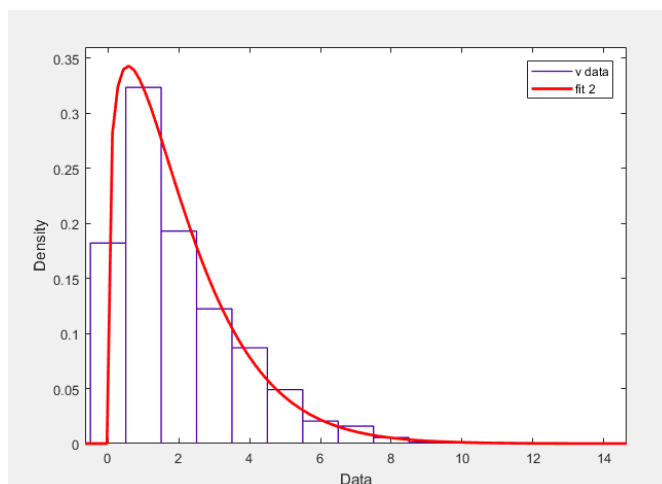
Diciembre	1,111	744	83,85619326
Enero (2018)	1,319	744	99,53533219

En total se recolectaron 33098 datos desde el mes de febrero del 2017 hasta el mes de enero del 2018, para este periodo de 1 año se calculó la velocidad promedio, el parámetro de forma, el de escala, el factor de planta y la energía que puede producir durante 1 año como se aprecia en la tabla IV.

**TABLA IV DATOS ENCONTRADOS PARA EL PERIODO DE 1 AÑO.**

	Velocidad Promedio (m/s)	A (m/s)	B	Factor de planta (%)	Energía (kWh/mes)
Año	1,997	2.17	1.234	6.053	5377,315

Por medio de estos parámetros se graficó la función de Weibull para todo el periodo de estudio (año) y así poder asemejar el comportamiento de la función con la densidad de frecuencia de todos los datos como se aprecia en la Figura 21.



**FIGURA 21 FUNCIÓN DE WEIBULL Y DATOS DE VELOCIDAD PARA TODO EL PERIODO DE ESTUDIO (AÑO).**

## 4.2 Potencial Solar en Hobo-Huila.

### 4.2.1 Caracterización de la demanda de potencia y energía de la piscifactoría.

Para el cálculo del potencial de energía solar en Hobo. Huila, el primer aspecto que se tomó para el diseño fue el consumo de energía eléctrica de la piscifactoría, por ende, se realizó una

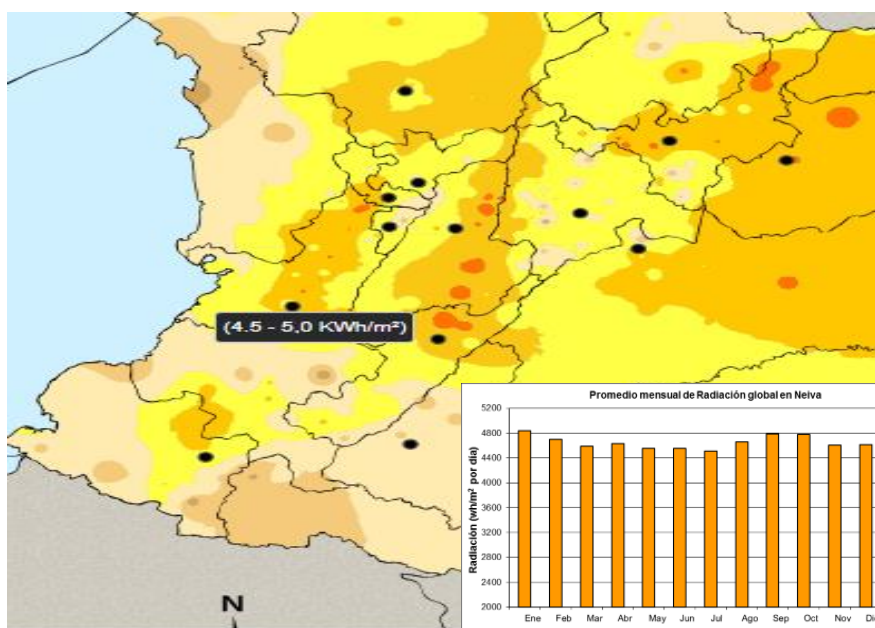
tabla V de los equipos que consumen energía eléctrica en la zona, dicha tabla tiene las características de potencia de los equipos y el tiempo de empleo por parte del usuario.

**TABLA V CONSUMO DE ENERGÍA DE LA PISCIFACTORÍA.**

Descripción	Cantidad	Potencia en H.P por unidad	Potencia en Watts por unidad	Tiempo funcionamiento diario (horas)	Energía(Wh/día)	Potencia (W)
Disipadores	12	0,75	503,55	5	30213	6042,6
Disipadores hielera	6	0,75	503,55	6	18127,8	3021,3
Cuarto frio 1	4	15	11185,5	6	268452	44742
Cuarto frio 2	2	25	18642,5	6	223710	37285
Hielera	2	60	44742	10	894840	89484
Cuarto frio hielera	2	7,5	5145,33	13	133778,58	10290,66
<b>TOTAL</b>					<b>1569121,38</b>	<b>190865,6</b>

## 4.2.2 Determinación de la radiación Solar en la Zona.

Para determinar la energía solar que incide sobre la superficie del departamento del Huila, se utilizó el atlas de radiación solar del ideam como se aprecia en la Figura 22, el cual arroja la irradiación solar horizontal media diaria, donde se observa que para el municipio de Hobo Huila es de 4,5 a 5  $kWh/m^2$ .



**FIGURA 22 IRRADIACIÓN SOLAR HORIZONTAL MEDIA DIARIA.**



Posteriormente por medio de la base de datos de la NASA, se ingresó las coordenadas específicas del lugar y se obtuvo las horas solar pico (HSP) de la zona como se aprecia en la Figura 23.

*Parameters for Tilted Solar Panels:*

Monthly Averaged Radiation Incident On An Equator-Pointed Tilted Surface (kWh/m <sup>2</sup> /day)													
Lat 2.586 Lon -75.453	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Annual Average
SSE HRZ	4.33	4.23	4.15	4.09	4.13	4.08	4.13	4.15	4.28	4.21	4.15	4.20	4.17
K	0.44	0.41	0.39	0.39	0.41	0.42	0.42	0.41	0.41	0.41	0.42	0.43	0.41
Diffuse	2.08	2.21	2.31	2.26	2.13	2.04	2.07	2.19	2.30	2.23	2.11	2.02	2.16
Direct	3.46	2.94	2.60	2.61	2.94	3.07	3.06	2.81	2.78	2.85	3.09	3.40	2.97
Tilt 0	4.28	4.18	4.10	4.04	4.07	4.02	4.07	4.09	4.22	4.16	4.10	4.15	4.12
Tilt 2	4.32	4.20	4.10	4.05	4.09	4.05	4.09	4.10	4.22	4.17	4.13	4.19	4.14
Tilt 17	4.52	4.26	4.04	4.00	4.13	4.13	4.16	4.09	4.10	4.19	4.28	4.42	4.20
Tilt 90	2.71	2.21	1.74	1.76	2.06	2.20	2.15	1.89	1.57	2.05	2.47	2.76	2.13
OPT	4.54	4.27	4.10	4.05	4.14	4.13	4.16	4.12	4.22	4.21	4.29	4.46	4.23
OPT ANG	24.0	15.0	4.00	5.00	13.0	17.0	15.0	9.00	0.00	11.0	21.0	26.0	13.3

NOTE: Diffuse radiation, direct normal radiation and tilted surface radiation are not calculated when the clearness index (K) is below 0.3 or above 0.8.

*Parameter Definition*

**FIGURA 23 DATOS DE HORA SOLAR PICO EN HOBO-HUILA.**


La hora solar pico o HSP es la unidad encargada de medir la irradiación solar y definirla como el tiempo en horas de una hipotética irradiación solar constante de 1000 W/m<sup>2</sup>. (Ver Figura 24). Las horas solar pico es un dato muy esencia a la hora del diseño del sistema fotovoltaico.



**FIGURA 24 HORA SOLAR PICO.**

### 4.2.3 Calculo de paneles solar a implementar en la psi factoría situada en Hobo-Huila

Para el cálculo del número de paneles solares necesarios para la instalación solar fotovoltaico primero se buscaron diferentes catálogos de paneles solare para escoger el panel que más se adecuara a la demanda del lugar. Se escogió el LG Solar MonoX Neon y Black (Ver Figura 25), este panel monocristalino se basa en silicio de tipo N. Esto conduce a un mayor grado de eficiencia que en las células convencionales tipo N.

Art. n°	0101555
	
Modelo	LG 300 N1C-B3 MonoX Neon
Potencia nominal	300 W +3 %, -0 %
Tensión máx. del sistema	1000 V
Tensión de servicio	32.0 V
Corriente de servicio	9.40 A
Tensión en circuito abierto	39.8 V
Corriente de cortocircuito	9.98 A
Coeficiente de temp. tensión en circuito abierto	-0.29 %/°C
Coeficiente de temp. corriente de cortocircuito	0.04 %/°C
Coeficiente de temp. potencia nominal	-0.41 %/°C
Carga máx. de corriente inversa	20 A
Temperatura admitida por el panel	-40 a +90 °C
Células por panel	60 uds
Dimensiones de la célula (l / a)	156 mm / 156 mm
Tipo de célula	Silicio monocristalino
Tipo de conexión	Cables 4 mm² con conectores MC4
Marco de montaje	Aluminio anodizado negro
Lámina posterior	Blanca
Dimensiones (l / a / a)	1640 mm / 1000 mm / 35 mm
Peso	16.8 kg ±0.5 kg
N° por contenedor / camión	756 uds
Carga máx.	5400 N/m²
Garantía de rendimiento *	25 años
Garantía de producto	10 años
Normas	IEC 61215, IEC 61730-1/-2, ISO 14001, ISO 9001, OHSAS 18001, UL 1703

**FIGURA 25 PANEL LG SOLAR MONOX NEON Y BLACK CON SUS RESPECTIVOS DATOS.**

El número de paneles necesarios para la instalación solar Fotovoltaica en la piscifactoría se determina (15) con la potencia individual de cada panel, la hora solar pico de irradiación del municipio y el consumo de los equipos de la piscifactoría (Tabla V).

$$N_T = \frac{E}{P_{MPP} * HSP} \quad (15)$$

Donde:

$E$  = Energía diaria estimada.

$P_{MPP}$  = Potencia Pico nominal del panel.

$HSP$  = Horas del sol pico.

Ya que la irradiación solar en cada mes es diferente, para el cálculo se utiliza el mes con más baja irradiación, que fue el mes de julio con 4,08:

$$N_T = \frac{1569121,38 \text{ Wh/día}}{300 \text{ W} * 4,08 \text{ h}} = 1282 \quad (16)$$

Se puede apreciar que para suplir el 100% de la demanda de energía en la zona se necesitan 1282 paneles solares. Como el sistema a implementar es un sistema híbrido (Eólico y solar), se utilizarán 648 paneles solares para suplir el 50% de la demanda y el restante se suplirá por medio de la turbina eólica. (Ver Tabla VI)

**TABLA VI NUMERO DE PANELES SOLARES NECESARIOS PARA SUPLIR EL 100%, 50% Y 25% DE LA DEMANDA.**

MES	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
HSP	4,33	4,23	4,15	4,09	4,13	4,08	4,13	4,15	4,28	4,21	4,15	4,2
ENERGIA DEL PANEL (Wh/día)	1299	1269	1245	1227	1239	1224	1239	1245	1284	1263	1245	1260
Número de panel (100% de la demanda)	1221	1250	1274	1293	1281	1296	1281	1274	1236	1256	1274	1259
Número de panel (50% de la demanda)	611	625	637	647	641	648	641	637	618	628	637	630
Número de panel (25% de la demanda)	306	313	319	324	321	324	321	319	309	314	319	315

La conexión de los paneles solares estará conformada por un sistema mixto (Serie y paralelo) donde, para determinar el número de paneles en serie es necesario conocer la tensión del panel y la tensión de trabajo del sistema.

$$N_{serie} = \frac{V_{sistema}}{V_{maxP}} = \frac{220 \text{ v}}{32 \text{ v}} = 6.875 \approx 7 \quad (17)$$

Por último, para determinar el número de paneles solares en paralelo se tiene que:

$$N_{paralelo} = \frac{N_T}{N_{serie}} = \frac{648}{7} = 92,57 \approx 93 \quad (18)$$

Por lo tanto se requieren 651 paneles solares organizados 93 ramales en paralelo con 7 paneles por rama para suplir la mitad de la demanda del consumo.

#### 4.2.4 Cálculo del Inversor a implementar en la piscifactoría.

Para el dimensionamiento del inversor se tiene en cuenta la Potencia instalada en la piscifactoría tomada de la tabla 5 la cual es de 190865 W y aplicar un margen de seguridad del 20%.

$$P_{Inversor} = 1,20 * P_{AC} \quad (19)$$

$$P_{Inversor} = 1,20 * 190865 \text{ W} = 229038 \text{ W}$$

#### INVERSOR SDS-250 kW

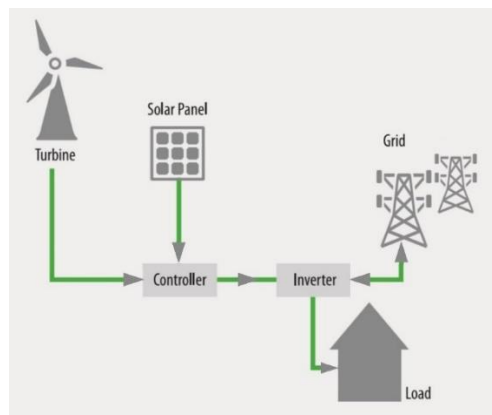
El inversor SDS con una máxima potencia de entrada CC de 275kWp a una tensión y corriente máxima de 800 V dc combina la robustez de una carcasa de acero inoxidable apta para instalaciones a intemperie. Figura 26.



**FIGURA 26 INVERSOR INVERSOR SDS-250 kW**

### 4.3 Análisis económico.

Para el análisis económico del proyecto, primero se indagaron los costos de inversión para un sistema eólico y un sistema solar conectados a la red (Ver Figura 27)



**FIGURA 27 SISTEMA EÓLICO SOLAR CONECTADO A LA RED.**

### 4.3.1 Costos de instalación de energía eólica.

Los costos de inversión para el montaje de la turbina eólica fueron estimados a partir de la información suministrada por GeolCOE el cual es un resultado del convenio conciencias – UPME denominado Costos Nivelados de Generación de Electricidad en Colombia.

#### **Obras civiles:**

En este apartado se detallan los costos relacionados con el montaje de la estructura, estos costos se calcularon por medio de la página web Enair la cual arroja el costo total la instalación. Para el cálculo de la obra civil se tuvo en cuenta el precio del servicio de la excavadora para realizar el trabajo de excavación del agujero donde se fijara la torre y la grúa para la instalación del montaje de la torre, también la cantidad de operarios en la obra y los materiales como el hormigón.

En total el costo de obra civil es equivalente a \$17.089.200

#### **Equipos mecánicos:**

Según el informe sobre el mercado de las tecnologías eólicas en Estados Unidos (Wiser & Bolinger, 2013), en el cual se realizó un estudio sobre las tendencias de los costos de los aerogeneradores, se muestra que el costo unitario de los aerogeneradores oscila entre 900 USD/ kW y 1300 USD/ kW para los últimos dos años. Se asume, para la valoración económica del proyecto, un precio promedio encontrado por Bloomberg en contratos realizados en USA que es 1150 USD/kW. Estos valores de los costos unitarios de los aerogeneradores son susceptibles de variación en el tiempo dada la evolución, madurez de la tecnología y el número de fabricantes en el mercado mundial.[11]

Por lo tanto, para un generador de 10kW el precio sería de \$ 3.815.711.

#### **Costos de operación y mantenimiento:**

Para mantener la mayor productividad posible en una torre eólica, es importante establecer un programa de acciones que minimicen los tiempos de parada por avería o mal funcionamiento de la instalación. Habitualmente, el mantenimiento de estas plantas es de carácter preventivo con el fin de evitar o mitigar los fallos e interrupciones del suministro de energía del sistema. El mantenimiento predictivo permite dar aviso antes de que falle un componente determinado y el mantenimiento correctivo para reparar el sistema después de que haya ocurrido una falla.

El principal componente del costo de operación y mantenimiento (O&M) para un sistema eólico lo constituye la reparación periódica y el reemplazo de componentes como: el transformador, el generador eléctrico, la transmisión y las palas del rotor de la turbina eólica. Para Colombia los costos de operación y mantenimiento son considerados aproximadamente en 40 USD/kW.[11]

Por ende, el costo operacional y mantenimiento para un sistema eólico de 10kW es de \$ 1.141.416.

### 4.3.2 Costos de instalación de energía solar.

Para el análisis de costo de un sistema solar conectado a la red se escogió el presupuesto dependiendo de la capacidad del sistema, esta capacidad estaba basada en el tipo de conexión que pueden llegar a ser más usados en Colombia. En la siguiente tabla se muestra las principales configuraciones y los supuestos de la evaluación.

**TABLA VII CONFIGURACIÓN Y SUPUESTOS DE DISEÑO.[12]**

Descripción	Sistemas aislados				Plantas conectadas a una mini red		Plantas conectadas a la red	
Capacidad del sistema	50	Wp	300	Wp	25	kW	5	MW
Vida útil de los módulos	20	Años	20	Años	25	Años	25	Años
Vida útil de las baterías	5	Años	5	Años	5	Años	No aplica	Años
Factor de capacidad	20	%	20	%	20	%	20	%

Para nuestro sistema de energía solar conectado a la red, con una capacidad de sistema de 177 kW el cual suplirá el 50% de la energía de la piscifactoría los valores del costo del capital del proyecto se basaron en la tabla VII para un sistema de 5MW como se aprecia en la siguiente tabla.

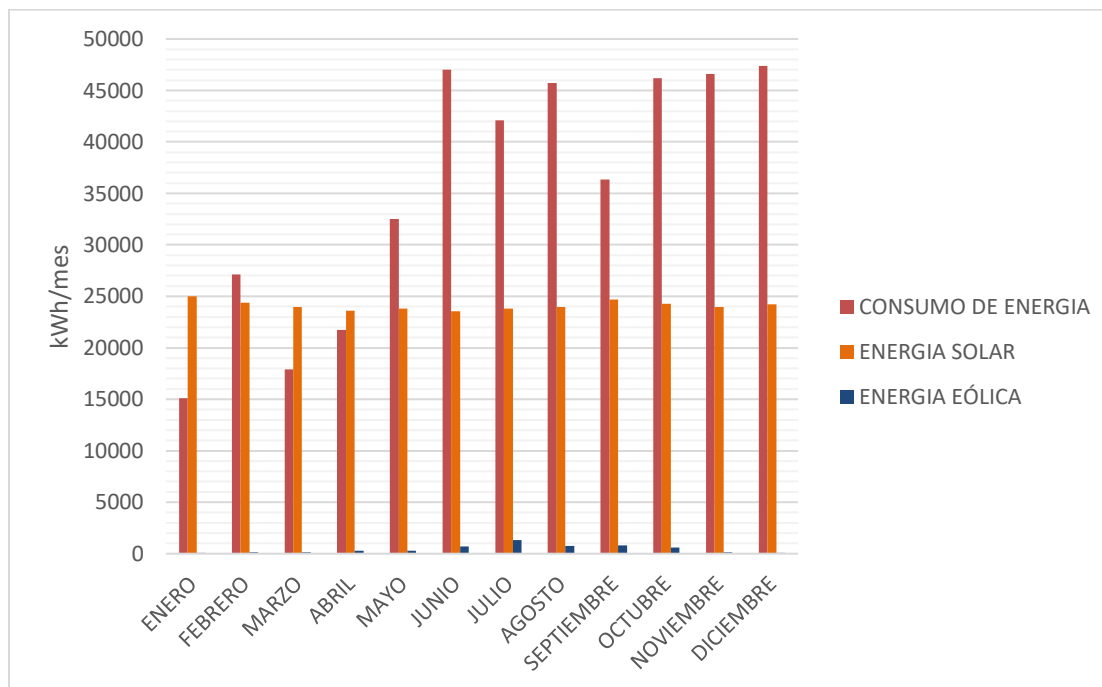
**TABLA VIII COSTO DE CAPITAL DE LAS DIFERENTES CONFIGURACIONES.**

Costo de capital (\$/kW)				
Capacidad del sistema	50W	300W	25kW	5MW
Equipos	6668	6668	4785	4504
Obras civiles	0	0	980	980
Ingeniería	0	0	200	200
Instalación	0	0	700	560
Margen de contingencia	700	700	700	680
Total	7368	7368	7365	6924

Por lo tanto, el costo de capital del sistema será de \$3.509.270.000

### 4.3.3. Estudio de factibilidad económica.

Luego de encontrar los costos del sistema híbrido a implementar en la piscifactoría, y conocer un valor estimado del proyecto, se puede estimar el tiempo de pago del proyecto. Para ello primero se analizó el impacto que tendría el sistema híbrido con respecto a el consumo. (Ver Figura 28)



**FIGURA 28 GENERACIÓN DEL SISTEMA HÍBRIDO CON RESPECTO A EL CONSUMO DE ENERGÍA DEL AÑO 2017**

Por medio de este análisis se encontró el porcentaje que ocuparía el sistema eólico y solar de la demanda de la piscifactoría como se aprecia en la Tabla IX.

**TABLA IX PORCENTAJE QUE OCUPA EL SISTEMA EÓLICO Y SOLAR.**

MES	PANELES SOLARES (%)	TURBINA EÓLICA (%)
ENERO	165,21	0,658
FEBRERO	89,98	0,5586
MARZO	133,9	0,605
ABRIL	73,26	1,427
MAYO	50,03	0,8821
JUNIO	56,56	1,6996
JULIO	52,36	3,1676
AGOSTO	52,36	1,666

SEPTIEMBRE	67,908	2,2686
OCTUBRE	52,57	1,241
NOVIEMBRE	21,376	0,2726
DICIEMBRE	51,117	1,7691

Ya conocido el impacto que generaría el sistema híbrido en la piscifactoría, se procedió a encontrar la reducción hipotética de energía y de dinero que se tendría con la implementación del sistema híbrido conectado a la red. Para conocer el costo de energía mensual del 2017 se utilizó recibos de la electrificadora del departamento (Ver Tabla X).

**TABLA X DEMANDA Y COSTOS MENSUALES DE ENERGÍA ELÉCTRICA CON EL SISTEMA HÍBRIDO CONECTADO A LA RED.**

MES	DEMANDA MENSUAL (kWh/mes)	DEMANDA MENSUAL CON EL SISTEMA HÍBRIDO (kWh/mes)	COSTO DE LA DEMANDA MENSUAL	COSTO DE LA DEMANDA MENSUAL CON EL SISTEMA
ENERO	15120	0	\$ 9.264.810	\$ 0
FEBRERO	27120	2565,7215	\$ 16.034.970	\$ 1.147.509
MARZO	17880	0	\$ 10.734.340	\$ 0
ABRIL	21720	0	\$ 13.196.800	\$ 0
MAYO	32520	8407,1421	\$ 19.668.860	\$ 3.760.061
JUNIO	47040	22786,5765	\$ 28.870.220	\$ 10.191.205
JULIO	42120	16959,8163	\$ 25.933.410	\$ 7.585.210
AGOSTO	45720	21016,7558	\$ 27.820.710	\$ 9.399.660
SEPTIEMBRE	36360	10843,816	\$ 22.347.380	\$ 4.849.853
OCTUBRE	46200	21339,199	\$ 27.888.200	\$ 9.543.871
NOVIEMBRE	46600	22531,6203	\$ 26.049.270	\$ 10.077.177
DICIEMBRE	47400	23086,34381	\$ 28.488.020	\$ 10.325.275
TOTAL	425800	149536,9913	\$ 256.296.990	\$ 66.879.821

Por lo tanto, se puede observar en la Tabla X la reducción que tendría el costo de energía implementando el sistema híbrido, este costo anual sería de \$ 66.879.821. Suponiendo que el comportamiento de la demanda del año 2017 se comportara de igual forma para los siguientes años, el sistema híbrido eólico solar para el año 2017 tendría una ganancia de \$ 189.417.169 anual, esto quiere decir que el proyecto se pagaría en aproximadamente 18 años y medio.



## Capítulo 5

### Conclusiones.

Tras la elaboración del proyector, , se determinó que el mes de mayor potencial para el sistema eólico es el mes de julio, donde en dicho mes por medio del aerogenerador E200L este entregaría 1334,213725 kWh/mes con un factor de planta del 17,68 %, (Ver Tabla III), este valor de energía es aproximadamente un 2,83 % del mayor consumo de energía eléctrica registrado en la piscifactoría (47040 kWh/mes), por ende es muy poca la participación del sistema eólico comparada con el consumo de la piscifactoría como se aprecia en la Figura 28. Por ende, no es muy viable implementar un aerogenerador en el sitio, ya que gran parte de la demanda la supliría el sistema de energía solar. Es de aclarar que el sistema de generación solar es muy factible para implementar en la zona, no solamente se tendría una ganancia por la reducción del consumo de energía si no por el excedente que tendría en algunos meses de al año.

Se espera que, con estos resultados, se dé el paso para seguir realizando estudios e inversiones en energías más amigables con el medio ambiente en el departamento del Huila, ya que la zona cuenta con un gran potencia para implementar dichas tecnologías y crear un cultura que busca nuevas alternativas para el mejoramiento del país.

## Lista de referencias

- [1] Q. Hernandez-escobedo, F. Espinosa-arenal, R. Saldaña-flores, and C. Rivera-blanco, "Evaluación del potencial eólico para la generación de energía eléctrica en el estado de veracruz, Mexico," *Dyna*, no. 171, pp. 215–221, 2012.
- [2] H. De Bautista, "Las turbinas eólicas," in *Control de la calidad de potencia en sistemas de conversión de energía eólica*, Universida., Plata, 2000.
- [3] E. Eficiencia and E. Renovable, "Sistemas Eólicos Pequeños para Generación de Electricidad."
- [4] J. Giménez Álvarez and J. Gómez Targarona, "Generación eólica empleando distintos tipos de generadores considerando su impacto en el sistema de potencia," *Dyna*, vol. 78, no. 169, pp. 95–104, 2011.
- [5] M. Villarrubia, *Ingeniería de la Energía Eólica*, Primera. Barcelona, 2013.
- [6] H. R. Murcia, "Desarrollo de la energía solar en Colombia y sus perspectivas Development of Solar Energy in Colombia and its Prospects," *Rev. Ing.*, vol. 28, pp. 83–89, 2009.
- [7] L. D. Gerra, "Estudio De Factibilidad Técnico / Económica De Un Sistema." septiembre, santiago de chile, p. 4, 2013.
- [8] E. M. Cano, *METODOLOGÍA PARA EL DESARROLLO DE PROYECTOS DE ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA Y EFICIENCIA ENERGÉTICA EN EL SECTOR RURAL DEL EJE CAFETERO*. Pereira: 2017, 2017.
- [9] T. Vargas and A. Abrahamse, "an Open-Source Hardware I-V Curve Tracer for Monitoring Pv Output in Bolivia," *Investig. Desarro.*, vol. 1, no. 14, pp. 100–116, 2014.
- [10] M. Rashid, *Electrónica de Potencia*, *Rashid.pdf*, Segunda. indiana.
- [11] D. Mejia, "COSTOS NIVELADOS DE GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD EN COLOMBIA." 2015, Medellin, pp. 1–59, 2015.
- [12] Consorcio energetico Corpoema, "formulacion de un plan de desarrollo para las fuentes no convencionales de energia en Colombia (PDFNCE)," pp. 1–1994, 2010.